

ЛОБАТЫЙ А.А., ХОЛОД П.В.

УПРАВЛЕНИЕ БЕСПИЛОТНЫМ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ ПРИ СОПРОВОЖДЕНИИ ПОДВИЖНОГО НАЗЕМНОГО ОБЪЕКТА

Белорусский национальный технический университет
г. Минск, Республика Беларусь

Статья посвящена решению задачи аналитического определения оптимального управления и синтеза траектории движения беспилотного летательного аппарата (БЛА) при сопровождении им движущегося наземного объекта (НО). На основе анализа установленных на БЛА современных систем слежения за НО предлагается путем экстраполяции на допустимо возможном интервале времени траектории движения НО определять требуемое управляющее ускорение БЛА. Рассматривается оригинальная кинематическая схема движения БЛА при его пролете через заданные прогнозируемые точки пространства, на основании которой формализуется математическая постановка задачи минимизации обоснованного функционала качества при заданных ограничениях в виде математической модели движения БЛА. Обоснованный выбор аналитического решения оптимизационной задачи позволил сформулировать закон управления ускорением центра масс БЛА, учитывающий изменение траектории движения НО и минимизацию затрат на управление. Приведенный пример математического моделирования оптимального управления БЛА и формирования траектории его полета при сопровождении НО показал работоспособность предлагаемой методики и перспективность ее применения для синтеза автопилотов БЛА на этапе предварительного проектирования.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, наземный объект, сопровождение, траектория, оптимальное управление

Введение

Беспилотные летательные аппараты (БЛА) имеют широкое распространение в различных областях человеческой деятельности. БЛА различаются конструктивным исполнением, предназначением, классифицируются по различным признакам. Основное предназначение БЛА – мониторинг земной поверхности и объектов, находящихся на ней. При этом одной из важных решаемых задач является наблюдение и сопровождение с помощью БЛА подвижных наземных объектов (НО), например, наблюдение за перемещением животных. Для экологов, биологов, специалистов сельского хозяйства важно знать особенности перемещения крупных наземных диких животных для того, чтобы обеспечивать их защиту, охрану сельскохозяйственных угодий, предотвращать нежелательные столкновения животных с людьми и техническими объектами. Для решения этих задач удобно применять БЛА, которые позволяют достичь необходимых результатов при относительно небольших затратах ресурсов.

Перемещение наземных объектов, в том числе и животных, происходит по различным траекториям, часто – непредсказуемым. Если, например, при сопровождении с помощью БЛА автомобиля, движущегося по шоссе, известна траектория его движения, а изменяться может только скорость, то другое дело – законы перемещения животных, которые изучаются биологами и имеют большое разнообразие [1].

При сопровождении наземного объекта БЛА должен перемещаться по определенной траектории, которая зависит от траектории движения НО. Траектория БЛА может быть эквидистантной к траектории НО (иметь ту же конфигурацию) или иметь относительно траектории движения НО определенное отношение (функциональную зависимость), определяемую специфическими конструктивными особенностями НО, БЛА и задачами сопровождения.

При сопровождении НО на борту БЛА необходимо иметь аппаратуру, определяющую координаты НО в реальном времени. В зависимости от типа и возможностей аппаратуры, размещенной на борту БЛА, существуют различные способы определения текущих координат НО [2, 3].

Формирование траектории полёта БЛА

Рассмотрим наиболее распространенный случай, когда НО перемещается по горизонтальной поверхности, а БЛА сопровождает его на постоянной высоте. На рисунке 1 представлены траектории движения НО и БЛА в заданной инерциальной системе координат $OXYZ$, в качестве которой удобно задавать стартовую систему координат, начало которой O находится в точке нахождения НО в момент начала сопровождения, ось X направлена в сторону первоначального движения НО и не изменяет направления, ось Y направлена вертикально к горизонтальной поверхности земли, ось Z составляет с осями X и Y

правую систему декартовых координат. На рисунке 1 \vec{D} – вектор дальности между центрами масс БЛА и НО, $\vec{V}_{\text{БЛА}}$ и $\vec{V}_{\text{НО}}$ – векторы скоростей БЛА и НО соответственно. По ориентации вектора $\vec{D} = D(t)$ определяются координаты НО при известных координатах БЛА.

Формирование закона управления управляющим ускорением и траекторией БЛА зависит от параметров изменения траектории НО $x_{\text{НО}}(t)$, $y_{\text{НО}}(t)$ (для плоской модели движения НО). Например, несмотря на непредсказуемость движения НО (животного), его траектория, как правило, имеет свои закономерности, определяемые целями движения НО, рельефом местности и другими факторами.

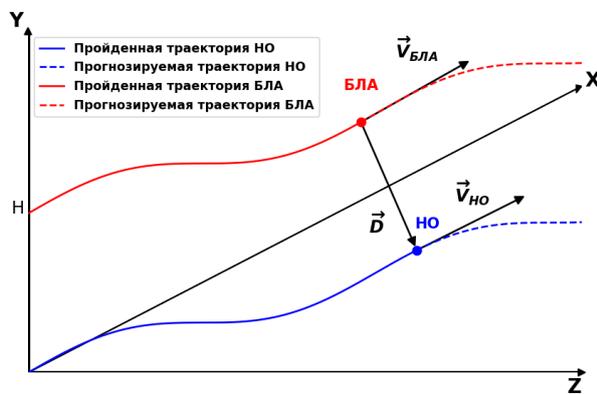


Рисунок 1. Траектории движения НО и БЛА

Система управления БЛА обладает определенной инерционностью, поэтому для синтеза оптимального управления БЛА необходимо иметь прогноз изменения координат траектории НО. Построение прогнозируемой траектории движения НО основано на измерениях текущих значений координат НО с последующей их пролонгацией (прогнозом). Простейший способ прогноза траектории НО путем аппроксимации дискретно измеренных текущих значений координат – линейный. Более точная аппроксимация значений координат НО и, соответственно, прогноз траектории основаны на аппроксимации с помощью полиномов n -й степени. Среди полиномов, используемых для приближения функции, наибольшее распространение имеют интерполяционные полиномы Лагранжа, Ньютона, Стирлинга, Бесселя [4]. Применение того или иного полинома имеет свои преимущества и недостатки. Распространенной и удобной для применения является интерполяционная формула Лагранжа, которая для данной задачи будет иметь следующий вид:

$$P(t) = \sum_{i=0}^n x_i \frac{\prod_{\substack{s=0 \\ s \neq i}}^n (t - t_s)}{\prod_{\substack{s=0 \\ s \neq i}}^n (t_i - t_s)}. \quad (1)$$

В формуле (1) t_i ($i = \overline{1, n}$) – значения аргумента (моменты времени измерения координат НО), x_i ($i = \overline{1, n}$) – значения функции (координаты НО), $P(t)$ – искомый полином n -й степени, принимающий те же значения при тех же значениях аргумента. Ограничение степени n полинома выбирается для конкретной задачи исходя из точностных и динамических характеристик аппаратуры, размещенной на БЛА и экспериментально определенных априорно известных особенностей движения различных типов НО.

Определение параметров движения НО с помощью аппаратуры, установленной на БЛА, осуществляется различными способами [5]. Широко распространенными являются оптико-электронные системы (ОЭС), позволяющие определять координаты НО в дискретные моменты времени с последующим вычислением скорости НО по формуле $V = \Delta x / \Delta t$, где Δt – временной интервал измерений, Δx – изменение соответствующей координаты НО за период времени Δt .

Интерполяция в промежуточных точках функции (траектории) позволяет оценить значения функции за пределами интервала заданных точек с помощью соответствующей зависимости, основанной на анализе расположения нескольких исходных точек на границе интервала данных. Современные информационные системы и технологии предоставляют широкие возможности решения прикладных задач. В системах компьютерной математики имеются встроенные функции, позволяющие решать задачи интерполяции и экстраполяции переменных, заданных дискретно. Например, в компьютерной среде Mathcad имеется функция предсказания вида $predict(Y, m, n)$, в которой Y – вектор заданных значений функции, обязательно взятых через равные интервалы времени, m – число последовательных значений Y , на основании которых функция $predict$ принимает n предсказанных значений Y [6].

Предсказание (пролонгация) значений экстраполируемой функции может иметь удовлетворительный результат на относительно небольшом интервале изменения значений экстраполируемой функции. Величина экстраполируемого интервала зависит от априорно известных свойств и параметров конкретного типа НО.

Определяя (прогнозируя) на некотором интервале траекторию движения НО можно сформировать оптимальную (квазиоптимальную) траекторию движения и закон управления БЛА.

Синтез оптимального управления

Существует ряд методов формирования оптимального управления и траектории движения летательных аппаратов [7-9]. Они различаются заданной математической постановкой задачи, критерием и наложенными ограничениями.

При формировании управления и траектории движения БЛА только по текущим измеренным координатам движения НО (метод «погони» [10]) имеет место запаздывание в формировании управления БЛА, излишнее «искривление» траектории БЛА, что приводит к дополнительным потерям энергии, затрачиваемой на управление, и к снижению точности сопровождения НО. Лучшего результата позволяет достичь наведение БЛА в упрежденную точку траектории.

В работе [7] предложен метод формирования оптимального управления БЛА путем поэтапного аналитического решения задачи оптимизации при пролете БЛА через заданные точки пространства. Дальнейшее развитие для решения прикладных задач метод получил в работах [8, 9]. Применим основные положения данного метода для управления БЛА при сопровождении подвижного наземного объекта. Особенностью применения метода в данной постановке задачи является задание прогнозируемых точек пространства, через которые должен пролететь БЛА. Это накладывает дополнительные ограничения на применение предлагаемого метода, связанные с допустимой точностью прогноза, ограничивающей интервал ΔX прогноза траектории (вектора координат БЛА $X = [x, y, z]^T$).

Пусть путем дискретных измерений с помощью бортовой аппаратуры БЛА (ОЭС) определяются текущие координаты и скорость НО. Траектория БЛА должна проходить симметрично (эквидистантно) над траекторией движения НО. Следовательно, прогнозированием траектории НО и высоты полета БЛА определяется точка пространства, через которую должен пролететь БЛА.

Кинематическая схема наведения БЛА в горизонтальной плоскости имеет вид, представленный на рисунке 2. Пространственная схема отличается рассмотрением отдельно горизонтальной и вертикальной схем движения БЛА или представлением траектории движения БЛА в плоскости, ориентация которой изменяется относительно заданной инерциальной системы координат.

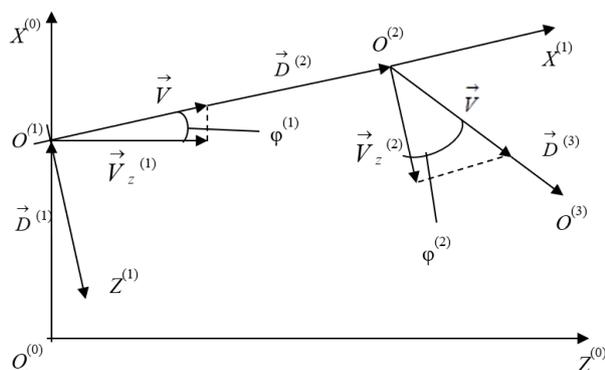


Рисунок 2. Кинематическая схема наведения БЛА

На рисунке 2 введены следующие обозначения: k – порядковый номер точки пространства, через которую должен пролететь БЛА ($k = \overline{0, N}$), \vec{V} – вектор скорости БЛА. ϕ^k – угол ориентации вектора \vec{V} в k -й точке. \vec{D}^k – вектор дальности от начальной (k -1-й) до конечной (k -й) точки k -го интервала траектории. O^k – начало указанной инерциальной системы отсчета на k -м участке траектории летательного аппарата.

Принципиальное отличие рисунка 2 и данной постановки задачи от известного решения, изложенного в [7-9], состоит в том, что промежуточные точки маршрута O^k ($k = \overline{0, N}$) не задаются заранее, а определяются (вычисляются) в процессе полета БЛА на основе измерений, произведенных бортовой системой наблюдения за НО.

Как и в работах [7-9] траектория перемещения БЛА из k -й точки в $k+1$ -ю точку должна быть такой, чтобы в $k+1$ -й точке вектор скорости БЛА был направлен в точку с номером $k+2$. Задача здесь усложняется в связи с тем, что прогноз k -х точек не может быть произведен на длительный интервал времени. Интервал прогноза Δt должен быть выбран исходя из свойств НО, конструктивных и динамических особенностей бортовой системы наблюдения, маневренных свойств БЛА.

Перевод динамической системы из одного состояния в другое (летательного аппарата в заданную точку пространства) представляет собой классическую задачу теории управления, решения которой определяются математической моделью объекта управления, в общем виде представленной многомерным (векторным) дифференциальным уравнением [7-9]:

$$X(t) = f(X, U, t), \quad X(t_0) = X_0. \tag{2}$$

$X(t)$ – вектор фазовых координат системы управления, $U = U(t)$ вектор управлений, t – текущее время. Минимизируемый функционал качества для такой задачи представляется в форме Больца [10, 11]:

$$J = \varphi(X_k, t_k) + \int_{t_0}^{t_k} F(X, U, t) dt. \tag{3}$$

Первое слагаемое в выражении (3) характеризует требования по состоянию системы $X_k(t_k)$ в момент окончания управления t_k . Второе слагаемое характеризует потери на управление в процессе управления. Классические методы решения данной задачи оптимизации (принцип максимума, динамическое программирование, вариационные методы), как правило, при применении в конкретных условиях нуждаются в принятии ряда допущений (линейные уравнения состояния и линейный функционал, другие допущения). Однако, принимаемые допущения при аналитических методах решения задачи оптимизации на практике, как правило, позволяют получить вполне удовлетворительные результаты.

Таким образом, для задачи, представленной кинематической схемой рисунка 2, минимизируемый функционал (критерий оптимальности) имеет вид [8, 9, 11]:

$$J = \frac{1}{2} \left[c_1 (V_z^{(k)} - V_{зад}^{(k)})^2 + c_2 (z^{(k)} - z_{зад}^{(k)})^2 \right]_{t=t_k} + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_k} c_3 (a_z^{(k)})^2 dt, \quad (4)$$

где t_k – момент времени, достижения БЛА определенной k -й точки пространства, $V_{зад}^{(k)}$ – проекция скорости летательного аппарата на ось $O^k Z^k$ в инерциальной системе отсчета на k -м участке в момент t_k , $z_{зад}^{(k)}$ – боковая координата k -й точки траектории полета БЛА в момент времени t_k . c_1, c_2, c_3 – коэффициенты, задаваемые с учетом размерности параметров минимизируемого функционала качества.

Система кинематических уравнений движения центра масс БЛА в горизонтальной плоскости имеет вид [10]:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}^{(k)} &= V_x^{(k)}; & x^{(k)}(0) &= x_0^{(k)}, \\ \dot{z}^{(k)} &= V_z^{(k)}; & z^{(k)}(0) &= z_0^{(k)}, \\ \dot{V}_x^{(k)} &= a_x^{(k)}; & V_x^{(k)}(0) &= V_{x0}^{(k)}, \\ \dot{V}_z^{(k)} &= a_z^{(k)}; & V_z^{(k)}(0) &= V_{z0}^{(k)}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

В системе уравнений (5) обозначено: x^k, z^k – координаты центра масс БЛА в заданной k -й системе координат; V_x^k, V_z^k – проекции вектора скорости \vec{V} БЛА на оси k -й системы координат; a_x^k, a_z^k – ускорения центра масс БЛА в k -й системе отсчета. Параметром управления БЛА в данном случае является боковое ускорение БЛА $a_z^k(t)$. Для случая, когда скорость полета БЛА постоянна ($V = \vec{V} = \text{const}$) в системе уравнений (5) можно представить $V_x^{(k)} = \sqrt{V^2 - (V_z^{(k)})^2}$.

При решении конкретных задач существует проблема выбора коэффициентов функционала (4) c_1, c_2, c_3 . В ряде случаев удобно задавать значения коэффициентов c_1, c_2, c_3 с учетом максимально допустимых значений минимизируемых параметров функционала (4), что позволяет провести нормировку слагаемых выражения (4). При этом коэффициенты c_1, c_2, c_3 имеют вид:

$$c_1 = \frac{1}{(V_z^{(k)} - V_{зад}^{(k)})_{\max}^2}, c_2 = \frac{1}{(z^{(k)} - z_{зад}^{(k)})_{\max}^2}, c_3 = \frac{1}{(t_k - t_0)(a_z^{(k)})_{\max}^2}. \quad (6)$$

В работе [11] получено аналитическое решение данной задачи, которое для каждого участка оптимизации (рисунок 2) имеет следующий вид:

$$a_z(V_z, z, t) = -\Lambda_V(t)[V_z(t) - V_{зад}] - \Lambda_z(t)[z(t) - z_{зад}], \quad (7)$$

где

$$\Lambda_V(t) = \frac{(1/c_2) + (1/c_1)(t_k - t)^2 + 1/3(t_k - t)^3}{D(t_k - t)}, \quad (8)$$

$$\Lambda_z(t) = \frac{(1/c_1)(t_k - t) + 1/2(t_k - t)^2}{D(t_k - t)}, \quad (9)$$

$$D(t_f - t) = \left[\frac{1}{c_2} + \frac{1}{3}(t_k - t)^3 \right] \left[\frac{1}{c_1} + t_k - t \right] - \frac{1}{4}(t_k - t)^4. \quad (10)$$

Заметим, что, как показано в [11], варьируя коэффициентами c_1, c_2, c_3 функционала (4), можно получить различные законы управления и, соответственно, – вид выражения (7).

Если $c_2 \rightarrow 0$, то $(z^k - z_{зад}^k)$ – неуправляемый параметр, и имеет место закон управления по скорости, если $c_1 \rightarrow 0$, то $(V_z^k - V_{зад}^k)$ – неуправляемый параметр. В обоих случаях для нашей задачи сопровождения НО это не обеспечивает достижения необходимого результата. Если $c_1 = 0, c_2 \rightarrow \infty$, то $(z^k - z_{зад}^k) \rightarrow 0$. Это означает, что необходимо обеспечить точное наведение в заданную точку пространства без учета скорости БЛА в момент окончания наведения (имеет место метод «пропорциональной навигации»).

В нашей постановке задачи, в соответствии с рисунками 1 и 2, необходимо в момент t_k обеспечить минимум отклонения координаты и скорости БЛА от заданных значений. В этом случае в функционале (4) $c_1 \rightarrow \infty$ и $c_2 \rightarrow \infty$ и должно обеспечиваться $(z^k - z_{зад}^k) \rightarrow 0$ и $(V_z^k - V_{зад}^k) \rightarrow 0$. В этом случае полученный аналитический закон изменения управляющего ускорения центра масс БЛА на каждом k -м участке траектории имеет вид [8, 9]:

$$a_z(V_z, z, t) = -\frac{4(V_z^{(k)} - V_{зад}^{(k)})}{t_k - t} - \frac{6(z^{(k)} - z_{зад}^{(k)})}{(t_k - t)^2}. \quad (11)$$

В формуле (11) $t_k - t = t_{\text{ост}}$ – время, которое необходимо для достижения летательным аппаратом последующей указанной k -й точки пространства.

$$t_{\text{ост}} = t_{\text{ост}}^{(k)} = \frac{D^{(k)}}{|\dot{D}^{(k)}|}. \quad (12)$$

D^k в данном случае является текущей дальностью от центра масс летательного аппарата до определенной точки O^k на k -м участке наведения, $|\dot{D}^k|$ – модуль скорости сближения летательного аппарата с точкой O^k . Для того, чтобы в формуле (11) избежать деления на ноль необходимо ограничивать $t_{\text{ост}}$ на фиксированной дальности $D_{\text{ост}}^k$. Это время целесообразно выбирать исходя из маневренных возможностей БЛА, например, $t_{\text{ост}} = 3\tau_{\text{БЛА}}$, где $\tau_{\text{БЛА}}$ – постоянная времени передаточной функции, описывающей динамические свойства БЛА (как правило – колебательное звено).

В качестве примера рассмотрим изменение траектории полета БЛА в горизонтальной плоскости на некоторой высоте H в соответствии с рисунками 1 и 2 при пролёте БЛА через заданные точки пространства, полученные с помощью оптико-электронной системы БЛА, со следующими координатами: $x^{(0)} = z^{(0)} = 0$; $x^{(1)} = 25$ м, $z^{(1)} = 0$; $x^{(2)} = 50$ м, $z^{(2)} = 20$ м; $x^{(3)} = 80$ м, $z^{(3)} = 40$ м (рисунок 3).

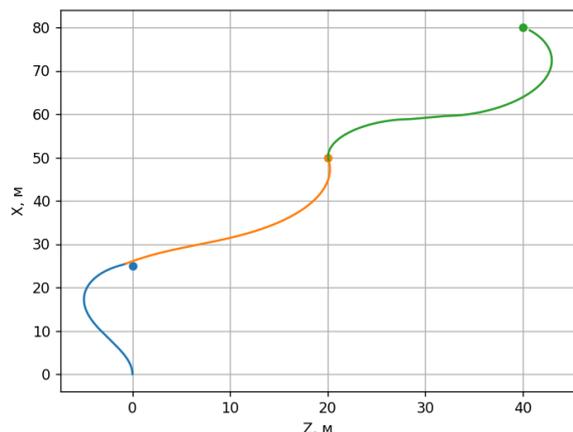


Рисунок 3. Результаты математического моделирования

Представленные результаты рассчитаны с использованием библиотек `numpy` версии 1.26.4 и `matplotlib` версии 3.8.4 на Python 3.10 для математической модели траектории полёта БЛА.

Заключение

Сопровождение беспилотным летательным аппаратом наземного объекта является актуальной задачей, для решения которой на борту БЛА должна присутствовать система дистанционного наблю-

дения и слежения за НО в виде оптико-электронной системы, позволяющей определять параметры траектории движения НО. Полученная информация от ОЭС БЛА позволяет синтезировать в автопилоте БЛА оптимальный закон управления для формирования соответствующей траектории движения БЛА. Для решения этой задачи в соответствии с классической теорией оптимального управления необходимо иметь информацию о координатах точки пространства, в которую переводится управляемый объект (БЛА). Следовательно, прогнозирование координат траектории движения НО является одним из условий синтеза оптимального управления.

На основе прогнозируемых координат траектории движения НО, заданной математической модели и критерия оптимизации аналитически решается задача определения управляющего воздействия (ускорения центра масс БЛА), требуемого для полета БЛА через заданные точки пространства по траектории, необходимой для успешного сопровождения НО.

Проведенное математическое моделирование приведённого выше примера показало работоспособность предлагаемого подхода, который на этапе предварительного проектирования системы управления позволяет сформулировать основные требования к автопилоту конкретного БЛА с учетом его предназначения и конструктивных особенностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. McLean D.J. An R package for characterisation of animal trajectories / D. J. McLean, M. Skowron Volponi // *Ethology*. – 2018. – Iss. 124. – P. 440-448.
2. **Беспилотные летательные аппараты. Основы устройства и функционирования** / под ред. И.С. Голубева, И.К. Туркина. – М.: МАИ, 2010. – 654 с.
3. **Холод, П.В.** Определение расстояния до объекта слежения БПЛА // *Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении: материалы XII международной научно-практической конференции* / ред. кол.: Околов А.Р. (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2023. – С. 158-159.
4. **Numerical Differentiation** [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://archive.nptel.ac.in/content/storage2/courses/122104018/node117.html> – Дата доступа: 01.10.2024.
5. Wang, X. Real-time multi-target localization from unmanned aerial vehicles / X. Wang, J. Liu, Q. Zhou // *Sensors*. – 2017. – Vol. 17, iss. 33. – P. 1-28.
6. **Экстраполяция функцией предсказания MathCAD 12** [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://radiomaster.ru/cad/mc12/glava_13/index07.php. – Дата доступа: 01.10.2024.
7. **Лобатый, А.А.** Интервально-оптимальное программное управление летательным аппаратом / А.А. Лобатый, М.А. Аль-Машхадани // *Наука и техника*. – 2014. – № 1. – С. 25-29.
8. **Лобатый, А.А.** Формирование оптимальных параметров траектории пролета беспилотного летательного аппарата через заданные точки пространства / А.А. Лобатый, А.Ю. Бумай, Ду Цзюнь // *Доклады БГУИР*. – 2019. – № 7-8. – С. 50-57.
9. **Лобатый, А.А.** Формирование траектории беспилотного летательного аппарата при облете запретных зон / А.А. Лобатый, А.Ю. Бумай, А.М. Авсиевич // *Системный анализ и прикладная информатика*. – 2021. – № 4 – С. 47-53.
10. **Меркулов, В.И.** *Авиационные системы радиуправления. Т. 2. Радиоэлектронные системы самонаведения* / под ред. А.И. Канашенкова и В.И. Меркулова. – М.: Радиотехника, 2003. – 390 с.
11. **Брайсон, А.** *Прикладная теория оптимального управления* / А. Брайсон, Хо Ю-ши. – М.: Мир, 1972. – 544 с.

REFERENCES

1. McLean, D. J. An R package for characterisation of animal trajectories / D. J. McLean, M. Skowron Volponi // *Ethology*. – 2018. – Iss. 124. – P. 440-448.
2. **Unmanned aerial vehicles. Basics of the device and functioning** / edited by I.S. Golubev, I.K. Turkin. – Moscow : MAI, 2010. – 654 p.

3. **Kholod, P.V.** Determining the distance to the UAV tracking object // Innovative technologies, automation and mechatronics in mechanical engineering and instrument making : proceedings of the XII international scientific and practical conference / ed. board: Okolov A.R. (editor-in-chief) [and others]. – Minsk, 2023. – P. 158-159.
4. **Numerical Differentiation** [Electronic resource]. – Access mode: <https://archive.nptel.ac.in/content/storage2/courses/122104018/node117.html> – Access date: 01.10.2024.
5. **Wang, X.** Real-time multi-target localization from unmanned aerial vehicles / X. Wang, J. Liu, Q. Zhou // Sensors. – 2017. – Vol. 17, iss. 33. – P. 1-28.
6. **Extrapolation by prediction function MathCAD 12** [Electronic resource]. – Access mode: https://radiomaster.ru/cad/mc12/glava_13/index07.php. – Access date: 01.10.2024.
7. **Lobaty, A.A.** Interval-optimal software control of an aircraft / A.A. Lobaty, M.A. Al-Mashhadani // Science and Technology. – 2014. – No. 1. – P. 25-29.
8. **Lobaty, A.A.** Formation of optimal parameters of the trajectory of an unmanned aerial vehicle's flight through given points in space / A.A. Lobaty, A.Yu. Bumai, Du Jun // Reports of BSUIR. – 2019. – No. 7-8. – P. 50-57.
9. **Lobaty, A.A.** Formation of the trajectory of an unmanned aerial vehicle when flying around restricted areas / A.A. Lobaty, A.Yu. Bumai, A.M. Avsievich // Systems analysis and applied information science. – 2021. – No. 4 – P. 47-53.
10. **Merkulov, V.I.** Aircraft radio control systems. T.2. Electronic homing systems / ed. by A.I. Kanashchenkov and V.I. Merkulov. – Moscow : Radiotekhnica, 2003. – 390 p.
11. **Bryson, A.** Applied optimal control / A. Bryson, Yu-Chi Ho. – Moscow: Mir, 1972. – 544 p.

LOBATY A.A., KHOLOD P.V.

UNMANNED AERIAL VEHICLE CONTROL IN THE TASK OF MOBILE GROUND OBJECT TRACKING

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

The article is devoted to solving the problem of analytical determination of optimal control and synthesis of the trajectory of an unmanned aerial vehicle (UAV) when tracking a moving ground object (GO). Based on the analysis of modern GO tracking systems installed on UAVs, it is proposed to determine the required control acceleration of the UAV by extrapolation over an admissibly possible time interval of the GO motion trajectory. An original kinematic scheme of the UAV motion is considered when it flies through specified predicted points in space, on the basis of which the mathematical formulation of the problem of minimizing the justified quality functional under specified constraints is formalized in the form of a mathematical model of the UAV motion. A justified choice of an analytical solution to the optimization problem made it possible to formulate the law of control of the acceleration of the UAV center of mass, taking into account the change in the trajectory of the GO motion and minimization of control costs. The given example of mathematical modeling of the optimal control of a UAV and the formation of its flight trajectory when accompanied by a ground object demonstrated the efficiency of the proposed method and the prospects of its application for the synthesis of UAV autopilots at the preliminary design stage.

Keywords: *unmanned aerial vehicle, ground object, support, trajectory, optimal control*



Лобатый Александр Александрович, доктор технических наук, профессор. Проводит исследования в области анализа и синтеза систем управления, в том числе – беспилотными летательными аппаратами. Автор и соавтор множества статей в научных журналах и конференциях, автор ряда книг и учебных пособий.

Alexander A. Lobaty, Doctor of Science, Professor. Conducts research in the areas of analysis and synthesis of control systems including unmanned aerial vehicles. He is the author and co-author of many articles in scientific journals, conferences and books.

E-mail: lobaty@bntu.by

Тел. +375 (29) 346-82-56



Холод Павел Викторович, аспирант кафедры «Робототехнические системы» Белорусского национального технического университета. Проводит исследования в области анализа и синтеза систем управления применительно к беспилотным летательным аппаратам.

Pavel V. Kholod, post-graduate student of the Department of Robotic Systems, Belarusian National Technical University. Conducts research in the field of analysis and synthesis of control systems applicable to unmanned aerial vehicles.

E-mail: KholodP@bntu.by